

岩質材料の動的破壊実験のための爆薬駆動高速載荷装置

中村裕一^{*}, 黒田泰徳^{**}, 松本安喜^{***}, 桐谷能生^{***}

高速載荷時の岩質材料の力学的特性変化や破壊挙動を調べる目的で、瞬発電気雷管の爆発力を駆動源にした高速載荷装置を試作した。本装置の基本構造は、鋼製フレームに取り付けられた水が充填された装薬室と負荷ピストン及び供試体下部に装着されるロードセルからなっている。試作装置の有効性を検証するために岩質材料としてモルタル及びコンクリートの供試体を作製し、高速圧縮荷重作用下及び高速圧裂引張荷重作用下における供試体の動的破壊挙動を高速度ビデオカメラで観察した。圧縮試験では、衝撃ロードセルによる荷重履歴測定や動ひずみ履歴測定を行い、高速載荷時の圧縮強度、平均応力増加速度を求めた。本実験によって、試作装置の性能評価として、繰り返し使用可能であること、圧縮試験時に約200MN/秒の平均荷重速度が得られることなどが明らかになった。測定値から静的圧縮強度に対する高速載荷時の圧縮強度の比については、1.7~2の値が得られた。圧縮強度の荷重速度依存性については、既往のデータと比較してその妥当性を明らかにしている。

1. 緒言

高速載荷や衝撃的負荷を受ける岩石やモルタル、コンクリートなどの岩質材料の変形性、破壊強度変化やき裂進展挙動などの動的特性の解明は、破砕性や掘削能率の評価、強震時の破壊挙動、爆破におけるき裂制御、岩盤の安定性などの問題に関係して重要である。材料の動的実験は載荷体を供試体に接触させて高速に変位させる高速載荷実験と載荷体を供試体に衝突させる衝撃実験に区別することが出来る。当然のことながら、衝撃実験においては応力波の作用が重要となる。初期の高速載荷実験では、静的実験に使用される機械式試験機が活用され、強度の載荷速度依存性に関心が集まった。その後、載荷速度を大きくすることの出来る装置が開発され、今日では一秒間に約 $10^7 \mu$ ひずみを生じさせる実験も報告されている。これまでの研究によって、強度だけでなく、応力-ひずみ関係、ヤング係数、ポアソン比なども載荷速度によって変化する速度効果の存在が確認されているが、載荷試験機の性能や測定の困難さなどのために、この問題の十分な解明は未だなされていないようである^{1),2)}。また、

衝撃実験については、最近、ポブキンソン効果を用いた岩石の動的破壊実験^{3),4)}や、その破壊プロセスの数値計算による理論解析⁵⁾が行われている。

このような従来研究の背景の中で、著者らはこれまでに、爆薬の動的作用に着目した装薬ホルダーを考案し、これを使用してモルタルやコンクリートなどの岩質材料中に進展方向が制御されたき裂を生じさせることが出来ることをすでに明らかにしている^{6),7)}。本研究は、このような岩質材料の動的破壊挙動に関するこれまでの研究の取り組みを応用発展させたものであり、高速載荷時の岩質材料の応力・ひずみ関係、強度やき裂進展挙動などの動的特性を調べる目的で、爆薬の爆発によって生じる衝撃波と爆発ガスを駆動源にした高速載荷装置を試作した。爆薬は瞬間的に非常に大きなエネルギーを放出するが、これを利用することによって、通常の試験機では困難な荷重速度を簡単な装置で安価に作り出すことが出来る。著者らのこれまでの研究実績から、電気雷管単体であっても、数トン程度の荷重を数百 μ 秒で発生させることが出来る装置が可能と思われる。本論文では、本研究の第1報として、これまでに試作した装置の概要、実験方法及びそれを用いて行った岩質材料であるモルタルやコンクリートの高速圧縮荷重作用下及び高速圧裂引張荷重作用下における動的破壊現象を高速度ビデオカメラで観察した結果を示す。圧縮試験では、衝撃ロードセルによる荷重履歴測定や動ひずみ履歴測定を行い、試作した高速載荷装置の性能評価を行った。

2000年9月5日受理

^{*}八代工業高等専門学校土木建築工学科
〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627
TEL 0965-53-1334
FAX 0965-53-1349

E-mail nakamura@as.yatsushiro-nct.ac.jp

^{**}八代工業高等専門学校専攻科

^{***}八代工業高等専門学校技術室

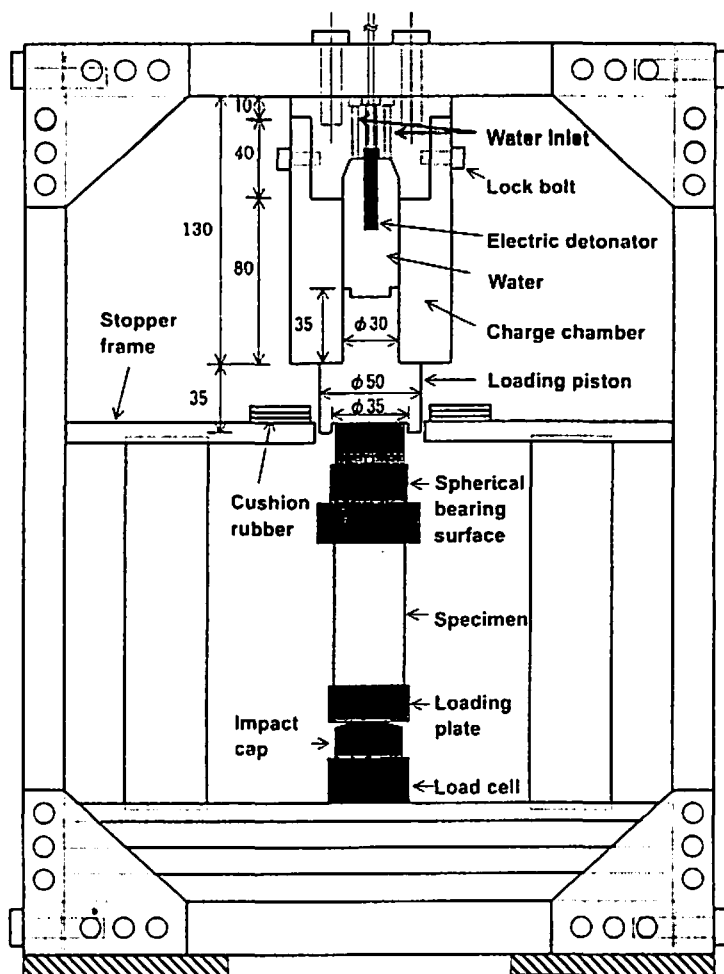


Fig. 1 High-speed loading apparatus driven by an electric detonator

2. 爆薬駆動高速載荷装置と実験方法

2. 1 爆薬駆動高速載荷装置の概要

これまでに試作した高速載荷装置をFig. 1に示す。装置は、鋼製フレームに取り付けられた装薬室に装薬として市販の地震探鉱用瞬発電気雷管(6号)を装着し、その爆発によって生じる力で負荷ピストンを駆動し、供試体に高速荷重を作用させようとするものである。最初に試作した装置では、装薬室内部は空気としていたが、十分な駆動力が得られなかった。このため、装薬室に水を充填する方式に改め、Fig. 1のような装置とした。このような水中爆発力を利用した高速荷重発生装置としては、新桐ダイナマイト4~7gを使用した高速荷重試験機が報告されている⁹⁾。Fig. 1における実験手順は、装薬室に電気雷管を装着した後、負荷ピストンを取り付け、固定ボルトを締め付けて一体化する。次に、装薬室上部の通水孔から水を装薬室に流し込み、充填させる。これらを鋼製フレームに取り付け、負荷ピストン下部に球座を取り付けて載荷面とする。この載荷面と鋼製フレーム下部に取り付けられたロードセルの間に供試体を配置した後、装薬

室上部の固定ボルトをゆるめて、装薬室下部と負荷ピストンが一体となって、作動するようにする。電気雷管が起爆されると装薬室内に水中衝撃波が発生し、水中衝撃圧が負荷ピストン上面に作用し、負荷ピストンが駆動される。本実験で装薬として使用した地震探鉱用電気雷管(6号)には主爆薬として、0.4gのペンスリットが使用されている。Fig. 1からわかるように、負荷ピストンは、その下部がストッパーとなる水平フレームに衝突すると停止するが、装着された球座は、供試体の破壊後、ピストン面から脱落している。

2. 2 実験方法

Fig. 2に、本実験のブロック線図を示す。装薬の起爆と計測機の同期をとるために、パルス発生器と起爆回路を使用した。本試作装置の荷重特性を評価するために衝撃ロードセルを用いて、発生荷重の時間履歴を測定した。使用した衝撃ロードセルは電圧モード型クォーツロードセル(PCB社製PCB-200B)である。その性能特性は、許容最大圧縮荷重133kN、共振周波数

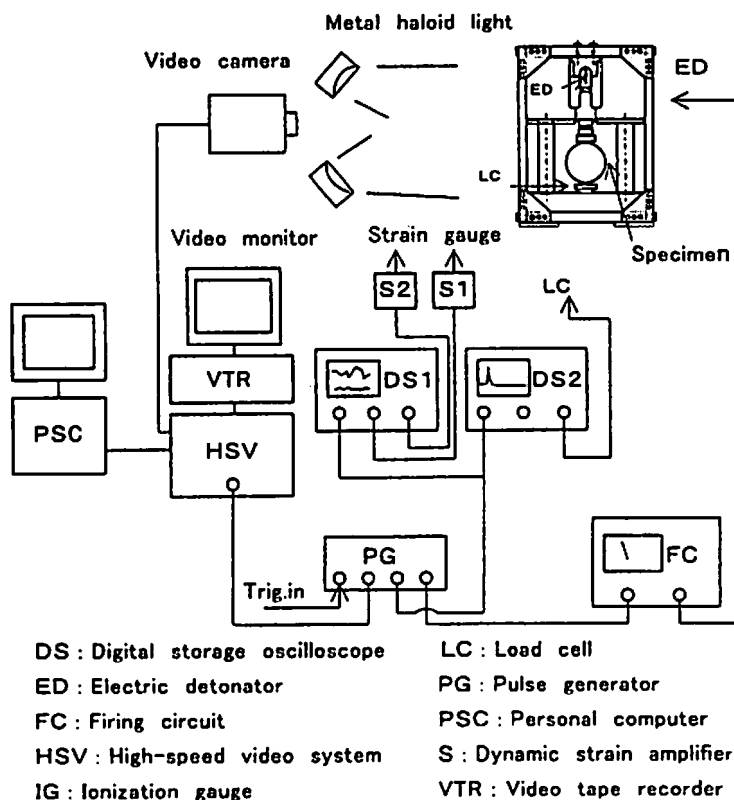


Fig. 2 Experimental setup for measurements

30kHz, 立ち上がり時間 $15\mu\text{sec}$ である。また、圧縮試験時の動ひずみ履歴を供試体側面に接着した2枚のひずみゲージ(ゲージ長10mm)で測定した。使用した動ひずみアンプの応答周波数は、DC~500kHzである。これらの波形記録には2台のデジタルストレージスコープを使用した。

高速度ビデオカメラによる高速破壊現象観察では、載荷装置に配置された供試体に2個のハロゲンランプの光をあてて、破壊挙動を撮影した。使用した高速度ビデオカメラはデジタルメモリー方式の画像記録装置で、同期機能によって、破壊現象に同期させて画像記録が可能である。分割フレームにすれば、最高撮影速度40500コマ/秒で49152枚の画像を記録することが出来る。

2. 3 供試体形状と力学的特性値

使用した岩質材料はモルタルとコンクリートで、その供試体の形状は、圧縮試験用が直径35mm, 高さ70mm, 圧裂試験用が直径100mm, 厚さ30mmである。岩質材料供試体作製においては、白色ポルトランドセメントを使用して練りこみ、その際にモルタル相の白色化を意図して白ペイントの水溶液を混入させた。これによって、粗骨材とモルタルの付着面やモルタル中のき裂形成が撮影画面において明瞭となった。また、

Table 1 Mechanical properties of the specimen materials

	Mortar	Concrete
P-wave velocity(km/s)	3.77	4.50
S-wave velocity(km/s)	1.97	2.23
Modulus of elasticity(GPa)	20.5	29.0
Compressive strength(MPa)	27.4	32.7
Tensile strength(MPa)	2.73	2.70

コンクリートについては、供試体の観察表面の粗骨材を明瞭にするために、10mmのふるいにとどまる大きさのものを練りこみ時に使用した。供試体作製において、圧縮試験用は角柱供試体からコアを抜き取り、端面仕上げした。圧裂試験用は、円柱供試体をコアカッターで切断して作製した。本実験に使用した岩質材料の力学的特性値をTable 1に示す。

3. 実験結果及び考察

高速圧縮破壊現象を記録したビデオ画像の一例をFig. 3, 5, 6に示す。この載荷装置では、供試体下面が直接ロードセルのインパクトキャップに接する場合は支圧荷重となり、供試体下部に縦方向き裂が多数生じる。このため、Fig. 1に示すように、供試体下面

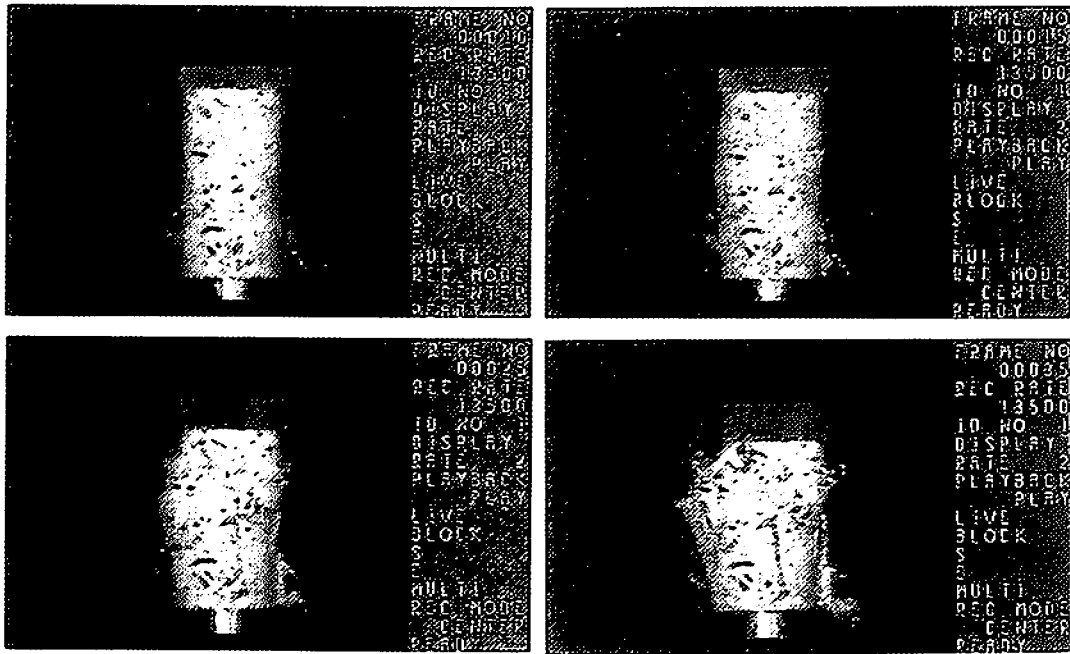


Fig. 3 Dynamic fracture behavior of the mortar specimen under uniaxial compressive loading recorded by the high-speed video camera (framing rates; 13500 f/s)

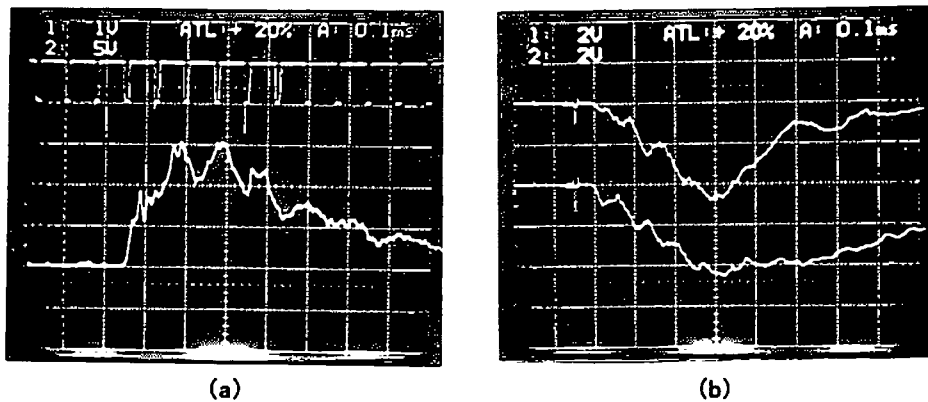


Fig. 4 (a) Load time trace from the load cell and (b) uniaxial strain time traces from the gauges attached to the specimen shown in Fig. 3. Horizontal time scale is $100 \mu\text{s}/\text{div.}$. The sensitivity of the charge amplifier is $16.4 \times 10^3 \text{ N/V}$ and the sensitivity of the strain amplifier is $2000 \mu\text{t}/\text{V}$. In (a), the upper signal shows the frame numbers of the video image after the trigger system was initiated.

とインパクトキャップの間に荷重板(載荷板)を装着して実験を行った。高速圧縮荷重作用下での破壊形態は、静的荷重の場合と同様に、縦方向き裂による場合、縦方向き裂とせん断破壊の組み合わせによる場合、せん断破壊による場合に区分けすることができる⁹⁾。Fig. 3は高速圧縮荷重作用下でのモルタルの動的破壊挙動を示している。ビデオ画像には、上側荷重面の運動開始がNo. 4フレームに捉えられている。実験では、起爆回路を起動させる信号を用いて、この高速ビデオカメラ装置のセントラトリガー機能を作動さ

せているが、電気雷管には起爆遅れがあるため、No. 1フレームが起爆した瞬間の画像とはならない。供試体の爆裂的破壊挙動は、No.10フレーム以後に捉えられている。Fig. 3から、この場合の破壊挙動として、供試体中央部が膨らみ、上部でせん断破壊が生じていることがわかる。これらは荷重面の端面拘束の影響と考えられ、供試体端面付近に沿って、せん断応力が生じ、供試体周縁部には応力集中が生じる¹⁰⁾。この時の高速圧縮荷重作用下でのロードセルの時間履歴をFig. 4 (a)に示す。また、供試体側面に接着されたひずみ

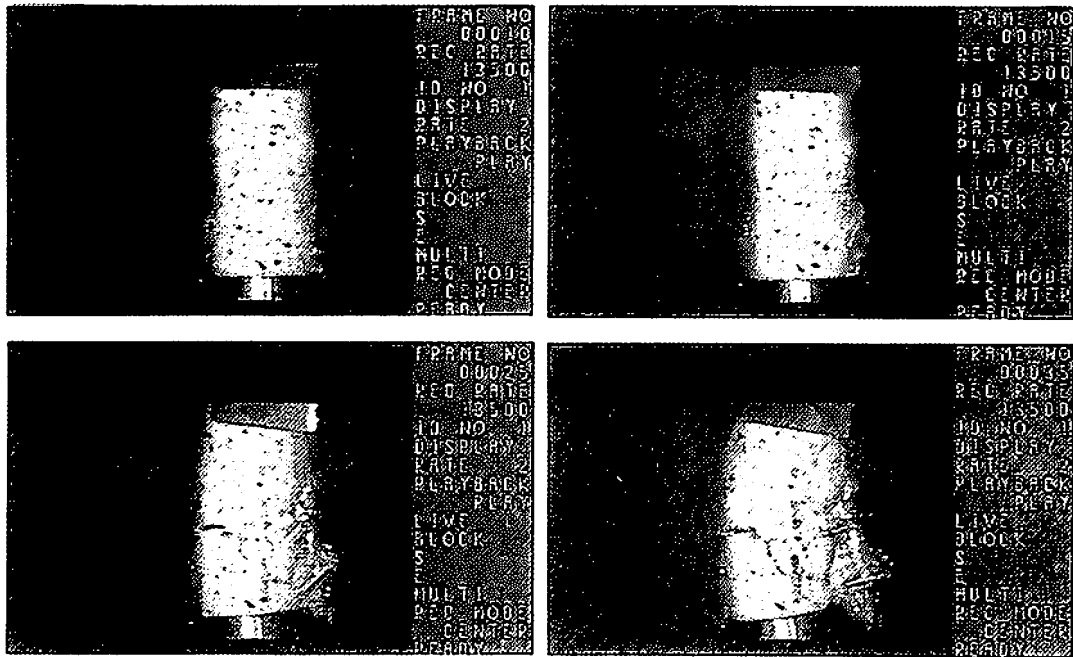


Fig. 5 Dynamic fracture behavior of the mortar specimen recorded by the high-speed video camera (framing rates; 13500 f/s). The images show the fracture behavior under an eccentric load. The loading condition was caused by the inclined upper end of the specimen.

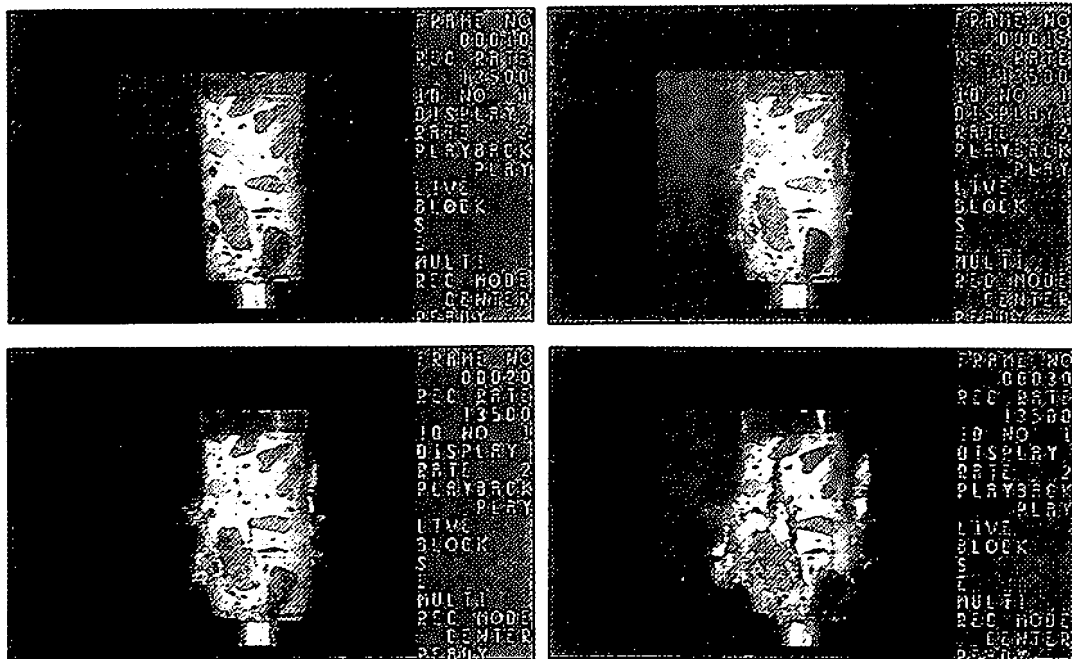


Fig. 6 Dynamic fracture behavior of the concrete specimen under uniaxial compressive loading recorded by the high-speed video camera (framing rates; 13500 f/s)

ゲージの時間履歴の波形をFig. 4 (b)に示す。これらの波形から、荷重と動ひずみの時間履歴がほぼ対応していることがわかる。荷重履歴の波形においては、立ち上り後、約 $50\mu\text{s}$ で少し振動しているが、これは装薬室内部での水中衝撃波の挙動に関係していると考え

られる。ロードセルの波形から平均荷重速度と高速載荷時の圧縮強度を求めた。この場合の圧縮強度は、Fig. 4 (a)に示したロードセルの出力波形のピーク値から計算した。Fig. 4 (a)の上側波形はビデオ装置のトリガー機能が作動した後の撮影画像のコマ番号に対

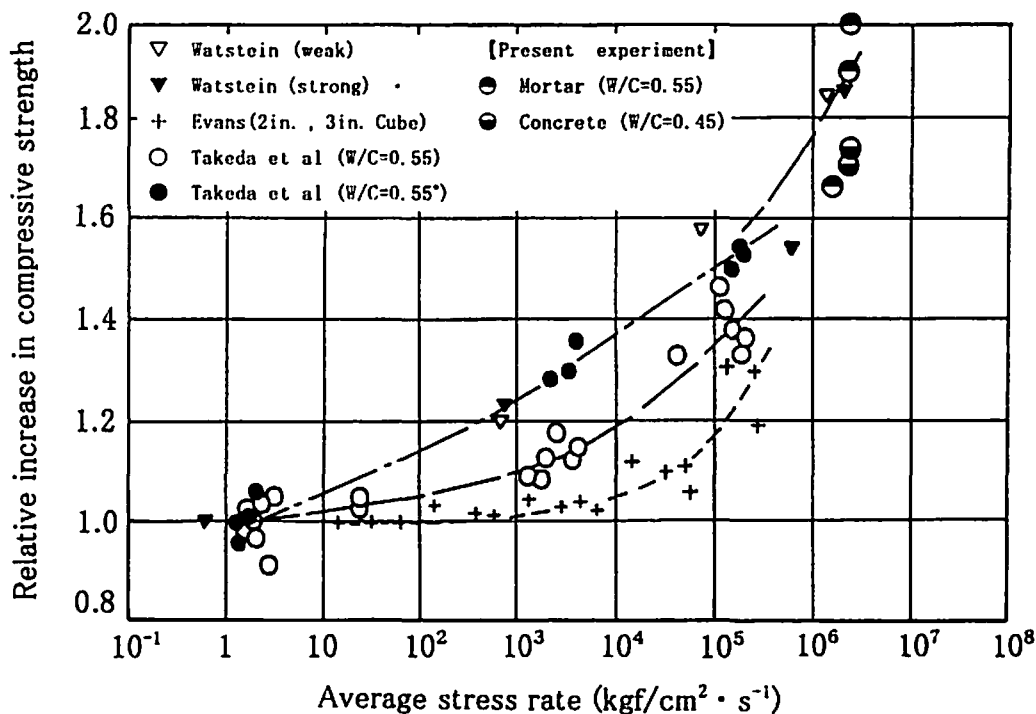


Fig. 7 Average stress rate influence on the relative increase in the compressive strength

応しているが、撮影画像を見ると、ロードセル波形が示すピーク値は供試体が破壊するまでの最大荷重であることがわかる。Fig. 4 (a)から求められるこの場合の平均荷重速度と高速載荷時の圧縮強度は200MN/秒及び52MPaが得られた。この高速載荷時の圧縮強度は静的圧縮強度の1.9倍になっている。Fig. 5での破壊挙動は、供試体上面の仕上げ不良に起因する偏心載荷によるもので、供試体右側面での曲げ圧縮破壊と左側面での曲げ引張破壊の状況が撮影されている。Fig. 6のコンクリートにおいては、No. 4フレームで負荷ピストンが始動し、No.10フレームになると供試体周縁部が膨らみ、下部付近の粗骨材面に縦ひび割れが生じている。この場合の平均荷重速度と高速載荷時の圧縮強度を求めると、220MN/秒及び56MPaが得られた。この圧縮強度は静的圧縮強度の1.7倍になっている。Fig. 7は得られた実験結果を文献1)のデータに図示したものである。本試作装置の平均応力増加速度が既往のデータの中で、高速であることや静的強度に対する高速載荷時の圧縮強度の割合(圧縮強度比)も妥当であることがわかる。

Fig. 8の高速圧裂引張荷重作用下でのモルタルの場合、No. 8フレームで、小さなき裂が発生し、No.10から13フレームになると載荷点を結ぶ線上の中央付近には、はっきりとき裂が読み取れる。No.14フレームになると、静的圧裂載荷時に生じるき裂面と同様に、この場合にも載荷点を結ぶ線にそって、き裂面が形成さ

れる。静的圧裂試験における供試体の破壊性状については、供試体断面中央付近に微小ひび割れが先行して発生し、荷重増加とともに載荷点に向かって進展して破壊に至ることが実験的研究によって明らかにされているが¹¹⁾、本実験結果はこれと一致している。Fig. 9のコンクリートの破壊挙動に関しては、No.10フレームで小さなき裂が供試体中央付近に生じ、載荷点を結ぶ断面にある粗骨材をさけながらき裂面が拡大する。載荷点付近では、粗骨材中をこのき裂が進展している。これには載荷点付近の応力状態が関係していることが考えられる。静的圧裂引張荷重作用下での応力解析から載荷点を結ぶ線上の横方向に引張応力が生じるだけでなく、荷重方向には圧縮応力が作用し、その値は載荷点付近では非常に大きくなることが示されている¹⁰⁾。また、前述の引用文献11)には、静的圧裂試験における供試体のひずみ状態は分布幅を有する荷重が載荷された場合の計算結果によく一致することが報告されているが、その理由として載荷点付近での局部的破壊によって荷重作用が面的になることが指摘されている。高速載荷時には、そのような面的な分布荷重としての作用効果も顕著となることも考えられる。

4. 結 論

岩質材料の動的破壊実験のための爆薬駆動高速載荷装置を試作し、モルタル及びコンクリートの供試体の破壊実験に適用した結果、以下のことが明らかに

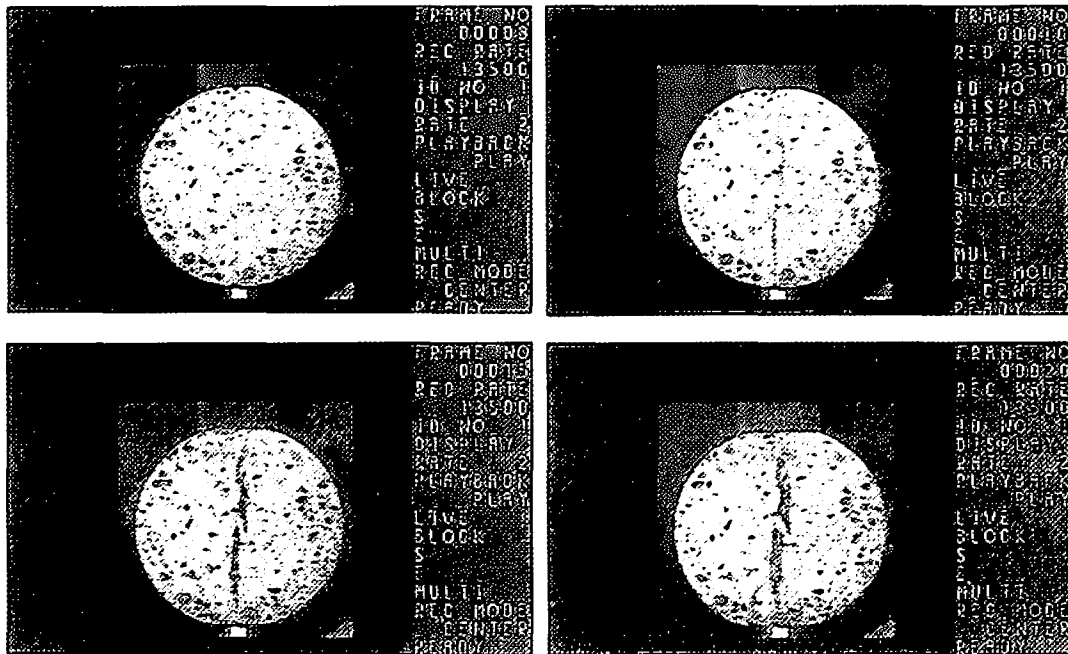


Fig. 8 Dynamic fracture behavior of the mortar specimen under splitting tensile loading recorded by the high-speed video camera (framing rates; 13500 f/s)

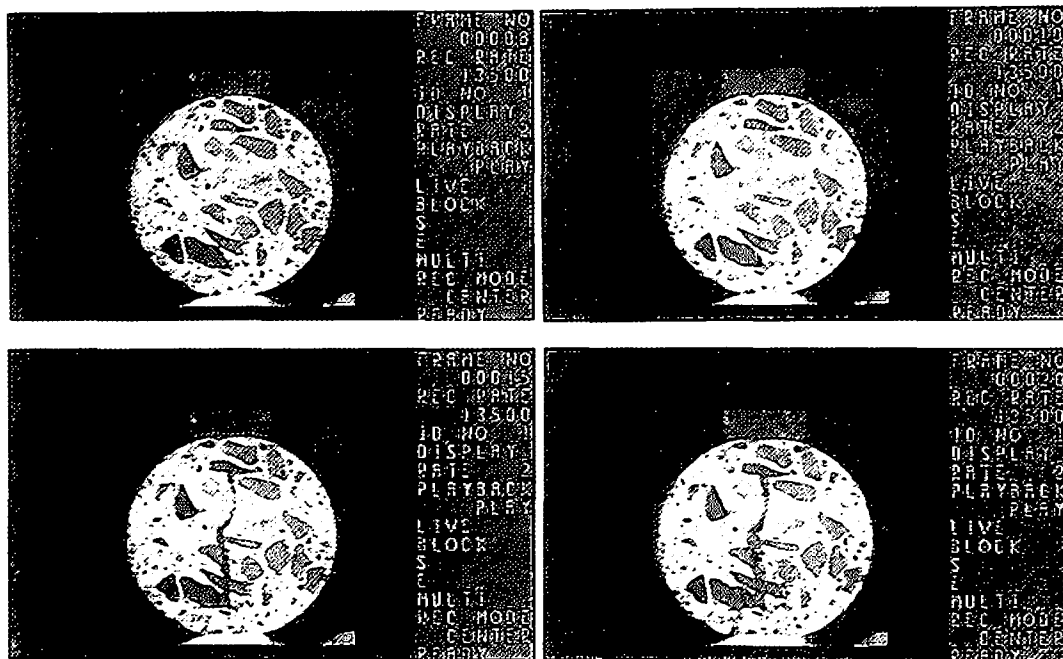


Fig. 9 Dynamic fracture behavior of the concrete specimen under splitting tensile loading recorded by the high-speed video camera (framing rates; 13500 f/s)

なった。

- (1) 本載荷装置は、特別な保守をすることなしに、繰り返し使用可能であることが確認できた。
- (2) 高速圧縮荷重作用下や高速圧裂引張荷重作用下でのき裂挙動が高速度ビデオ画像によって明らかになった。モルタルの圧縮実験では静的載荷と同様の破壊形態が生じる。圧裂引張実験では、上下の

載荷点を結ぶ線上の供試体断面中央付近において、引張によるき裂が生じる。

- (3) 測定した圧縮試験時の荷重履歴から高速載荷時の圧縮強度と平均応力増加速度を求めた。静的強度に対する高速載荷時の強度の比は1.7~2倍となり、既往の実験結果との比較から、この値は載荷速度との関係において、妥当であると思われる。

謝 辞

装置の試作開発にあたっては、八代高専技術室福山係長、浦本技術専門職員はじめ、関係者の支援を受けた。本実験を遂行するに際しては、卒研究生として参加された上米良健氏(現在九州電力株式会社勤務)、田代晋也氏(現在大阪ガス株式会社勤務)の協力を得た。また、本研究の費用の一部には文部省科学研究費補助金(基盤研究B-(2)、課題番号09555323)を使用した。ここに記して、感謝の意を表す。

文 献

- 1) 竹田仁一, 立川博之, 藤本一男, コンクリート工学, 15, 1-11. (1977)
- 2) P. H. Bishoff and S. H. Perry: *Materials and Structures*, 24, 425-450(1991)
- 3) 勝山邦久, 緒方雄二, 和田有司, 工業火薬, 53, 182-192(1992)
- 4) 馬貴臣, 三宅淳巳, 小川輝繁, 歌川学, 和田有司, 緒方雄二, 瀬戸政宏, 勝山邦久, 火薬学会誌, 59, 49-56(1998)
- 5) 加藤昌治, 川上純樹, 米田哲朗, 金子勝比古, 和田有司, 緒方雄二, 勝山邦久, 火薬学会誌, 60, 240-249(1999)
- 6) 中村裕一, き裂制御爆破工法, 特許庁特許公報1996, 出願公告番号・特公平8-12040.
- 7) 中村裕一, 岩本誠治, 深浦貴之, 上米良健, 第4回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 241-244(1998)
- 8) 小林良二, 日本鉱業会誌, 85, 911-916(1969)
- 9) 山口梅太郎, 西松裕一共著, 岩石力学入門, p. 119. 東京大学出版会
- 10) 土質工学会編: 岩の工学的性質と設計・施工への応用, 第3章岩石試験法, 土質工学会
- 11) 町田篤彦, 土木学会論文報告集, 297, 99-112(1978)

A new high-speed loading apparatus driven by explosives for dynamic fracture experiments of rock-like materials

Yuichi NAKAMURA*, Yasunori KURODA*, Yasuki MATSUMOTO*,
and Yoshio KIRITANI*

Strength, stiffness and brittleness of rock-like materials are affected by the rate of loading. However, there is a lack of data at high rates of loading. In this paper, a new experimental method by means of a high-speed loading apparatus driven by explosives was presented for dynamic load tests of rock-like materials. The loading apparatus consists mainly of a charge chamber attached to steel frames, a loading piston and a load cell. The charge chamber is filled with water and the apparatus is driven by an explosive charge, an electric detonator. The mortar and concrete specimen were loaded in compression and / or splitting tension. The dynamic fracture processes of the specimens were observed by high-speed videography. The dynamic load and axial strains in compression were measured by using a piezoelectric type load cell and strain gauges, respectively.

It was shown from the experimental results that the fracturing process of the specimen in uniaxial compression is affected by frictional restraint of the end loading surfaces, the crack patterns are altered by the presence of shear failure, and the compressive strength of the specimen is found to be as much as 70~100 % greater than the static strength. In the splitter tension test, cracks are firstly initiated near the center of the cross section of the specimen and the cracks propagate to the loading points.

(*Yatsushiro National College of Technology, 2627 Hirayama-shinmachi, Yatsushiro, Kumamoto 866-8501, JAPAN)